

# 混凝土扭转剪切徐变试验方法及其应用

牛艳伟<sup>1</sup>, 曹宏恩<sup>2</sup>, 汤颖颖<sup>3</sup>, 王 涛<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国葛洲坝集团 PPP 事业部, 湖北 武汉 430033;

3. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为研究大跨径混凝土梁桥在长期变形分析时剪切徐变的影响, 针对剪切徐变系数的取值问题, 提出一种基于扭转的剪切徐变试验装置和测试方法, 并开展三组混凝土试件的剪切徐变试验研究; 获取 375 d 的徐变系数曲线, 利用现行规范模型的参数修正, 对剪切徐变的发展规律进行分析, 并通过有限元对结果进行验证. 研究结果表明: 基于扭转的剪切徐变试验装置可对构件进行有效加载; 通过扭转剪切得到的徐变系数计算公式可用于试验数据分析; C30 混凝土试验剪切徐变终极值为规范轴压徐变终极值的 2.26~2.63 倍, 剪切徐变在受荷早期的发展低于轴压徐变, 但后期逐步加速; 受扭构件等剪切影响显著的结构徐变计算应考虑剪切徐变效应.

**关键词:** 混凝土桥梁; 徐变; 剪切; 扭转; 试验

**中图分类号:** U446.1

**文献标志码:** A

## Concrete Torsion Shear Creep Experimental Method and Application

NIU Yanwei<sup>1</sup>, CAO Hongen<sup>2</sup>, TANG Yingying<sup>3</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. China Gezhouba Group, PPP Division, Wuhan 430033, China; 3.

School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** To study the effect of shear creep on long-term deformation of large span concrete bridge, aiming at the problem of shear creep coefficient, an experimental device and test method based on torsion was proposed for shear creep test. Three groups of shear creep members were tested to obtain creep coefficient curve lasted in 375 days. And based on the modification of axial compression creep model of current specification, the rules of shear creep progress was analyzed with finite element (FE) analysis verification. The results show that the shear creep test device based on torsion can be used to load the concrete element effectively. And creep coefficient formula deduced from torsion creep can be used for test data analysis. The C30 concrete shear creep

ultimate value is 2.26 ~ 2.63 times of specification compression model. The early aged shear creep progressed smaller than compression creep, but accelerated in the later age. Torsion and other significantly shear effected structures should consider shear creep action in creep analysis.

**Key words:** concrete bridge; creep; shear; torsion; experiment

混凝土的徐变是指在恒定外荷载作用下, 结构除产生弹性应变外, 其应变随时间继续增大的现象, 混凝土徐变是导致混凝土桥梁结构长期变形的主要因素<sup>[1-2]</sup>, 对于大跨径混凝土梁桥, 徐变效应的控制不当或预测不准将引起变形过大及开裂问题<sup>[3]</sup>. 通常梁式桥梁的挠度计算以弯曲应变为主, 是否考虑剪切变形根据高跨比决定. 已有学者通过抗剪试验研究发现, 箱梁开裂后的剪切变形对结构的总体变形影响较大, 且随时间推移, 影响将不断增加<sup>[4-5]</sup>. 并有学者通过分析剪切变形对箱梁挠度的影响规律, 推算了箱梁的剪切徐变挠度, 并通过计算表明剪切徐变是造成箱梁持续下挠的原因之一<sup>[6]</sup>. 随着有限元程序的发展, 黄海东等利用 ADINA 软件开发了空间应力状态下的徐变分析计算子程序<sup>[7]</sup>, 汪剑<sup>[8]</sup>等按照叠加原理进行徐变系数的计算, 考虑了温度、湿度及构件局部理论厚度对徐变的影响. 文献<sup>[9]</sup>基于叠加原理实现了 ANSYS 的混凝土三维有限元徐变计算. 上述研究均假设剪切徐变模型与轴向徐变相同.

目前混凝土徐变模型基本上是在建立在试验数据基础上的经验公式, 2007 年 Rajeev 所对比的多种徐变预测模型<sup>[10]</sup>以及 2014 年 Wendner 提出的 B4 徐变模型<sup>[11]</sup>, 虽然考虑的计算参数和影响因素更加全面, 但其试验条件均为单轴应力状态, 针对混凝土在

收稿日期: 2018-10-05

基金项目: 国家自然科学基金(51208056); 中央高校基本科研业务费专项资金(310821161013, 300102218213)

第一作者: 牛艳伟(1981—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为桥梁时效性. E-mail: niuyanwei@163.com

剪切应力状态下的徐变试验研究匮乏. 轴向受压徐变通常采用文献[12]所提出的凝固理论描述, 在此基础上, 后续研究提出了三维徐变的微观力学模型[13], 增加了对有侧向约束轴压徐变的描述. 伴随徐变研究的深入, 关于受拉状态下的徐变研究逐渐开展, Hilaire 根据受压区和受拉区测点长期应力观测, 发现两种受力状态下混凝土的徐变存在较大差异, 截面长期应力变化呈现非线性[14]. Wei 等的研究同样表明现有徐变模型难以对收缩及约束引起的拉应力做出合理预测评估, 从而提出了一种优化的受拉徐变模型用以评估拉应力的发展及开裂预测[15]. 文献[16]开展了裂缝对剪切变形的短期效应的试验研究, 但未考虑长期徐变变形.

可见, 大跨径混凝土梁桥的剪切徐变影响不容忽视, 但由于相关试验研究缺乏, 现有的徐变模型还未涉及剪切应力的徐变, 难以考虑其影响. 由此, 本文探讨一种测试混凝土剪切徐变的方法, 通过施加扭矩使混凝土构件处于扭转剪切状态, 对比轴压徐变计算模型, 修正剪切徐变参数, 可为混凝土桥梁长期变形的计算和预测提供参考.

## 1 剪切徐变试验装置及原理

### 1.1 混凝土剪切徐变试验装置

为得到剪切应力作用下混凝土徐变特性, 通过对混凝土圆柱体自由施加恒定扭矩, 使构件截面只受剪切应力作用. 剪切徐变试验装置如图 1a 所示由三部分组成: ① 底座与支撑钢架; ② 圆柱体剪切试件; ③ 荷载托架与连接的悬吊钢丝绳.

剪切试件与混凝土底座固结, 支撑钢架通过螺栓与混凝土底座固结; 荷载托架连接钢丝绳并通过支撑钢架上的转换槽转至水平方向后与试件顶部预埋的传力钢筋连接. 共设置 4 根钢丝绳连接荷载托架与试件, 调整钢丝绳长度使悬吊的荷载托架保持水平. 加载时将预制的标准荷载块对称、逐步加载到荷载托架上. 如图 1b 所示, 托架荷载  $F$  由 4 根钢丝绳通过转换槽将竖向力转换成水平力对称施加到混凝土试件顶部周围, 形成扭矩  $T$  作用, 图中  $r$  为试件截面半径.

由于试件在加载后所产生的扭转变形将转换为荷载托架的竖向变形, 如图 2a 所示在荷载托架与底座之间预留 10 cm 间隙. 荷载托架利用支撑钢架与剪切试件之间的空间进行设置, 如图 2b 装置俯视图所示, 在托架上堆载后, 托架在竖向变位时与支撑钢

架和剪切试件均不接触.

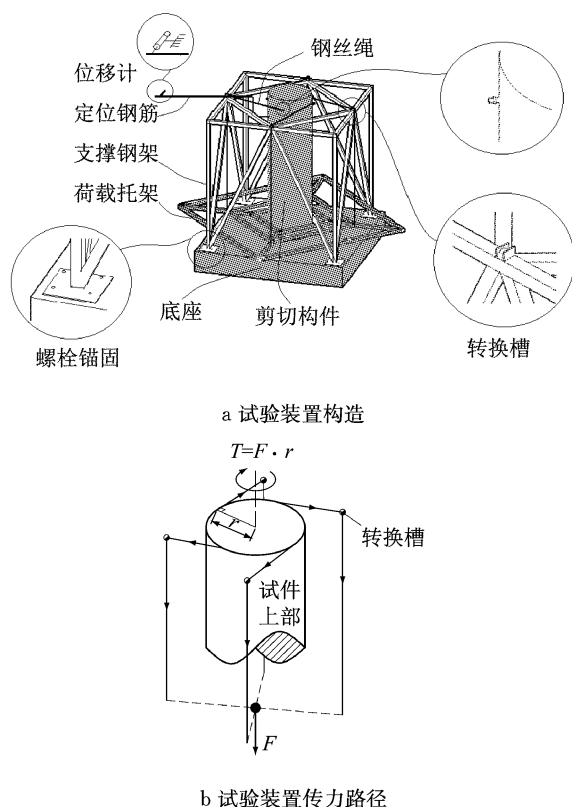


图 1 剪切徐变试验装置示意

Fig.1 Experiment device diagram of shear creep

组装完成的剪切徐变装置如图 2c 所示, 加载时通过调整托架上的标准重块数量, 可实现不同应力等级的加载. 加载后, 底座、试件及荷载托架处于自平衡状态, 使试验装置在长期加载过程中保持荷载恒定与体系稳定.

为减小试验构件的尺寸并放大变形以提高测试精度, 在测试截面设置定位钢筋并延伸一定长度, 测试截面定位钢筋沿切向的直线位移, 根据等直圆杆扭转的几何关系, 得到构件横截面上的剪切应变.

### 1.2 混凝土剪切徐变系数测试原理

假定: 试件在加载阶段处于弹性范围内, 长期测试阶段在线性徐变范围内, 试件应力在材料强度的 40% 以内, 不计非线性徐变.

由 1.1 可知, 试验中直接测得的是试件顶端由于扭转产生的切向位移, 而剪切变形是用剪切角来度量的, 二者转换过程如下: 对于承受扭矩作用的混凝土圆柱体, 其截面上只有剪切应力, 构件在扭转时, 横截面上任意一点处的切应变  $\gamma(\rho)$  为

$$\gamma(\rho) = \frac{T\rho}{GI_p} \quad (1)$$

式中:  $T$  为作用在横截面的扭矩;  $I_p$  为横截面的极惯性矩;  $\rho$  为任一点距圆心的距离;  $G$  为剪切弹性模量.

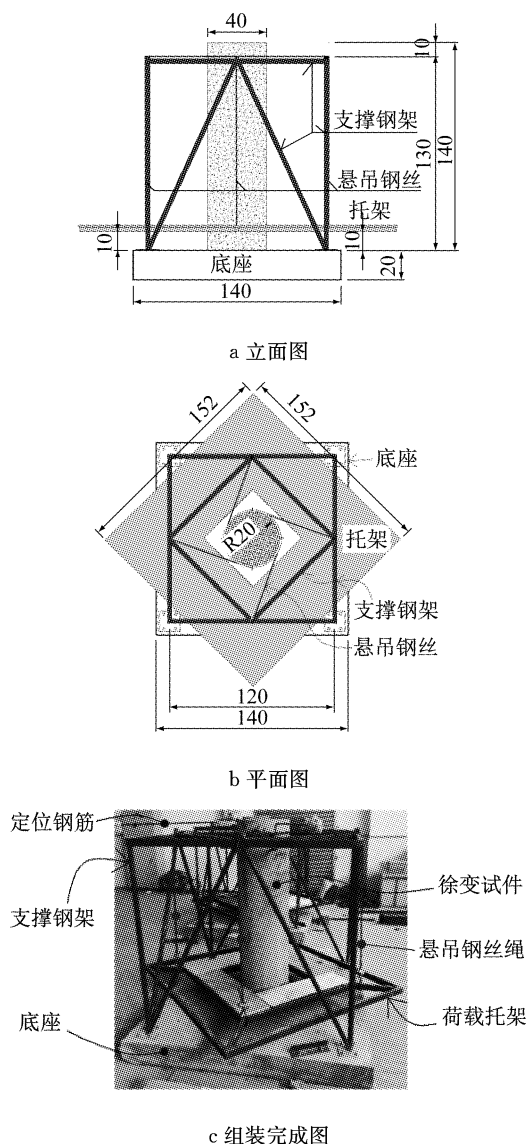


图 2 剪切徐变试验装置示意 (单位:cm)

Fig.2 Experiment device of shear creep (unit: cm)

假设圆柱体高  $L$ , 截面半径为  $r$ , 定位钢筋测试长度为  $l$ , 在试件混凝土龄期为  $t_0$  时开始加载, 则定位钢筋测试点产生的瞬时位移增量为  $\Delta u(t_0)$ , 对应的瞬时切应变  $\gamma(t_0)$  为

$$\gamma(t_0) = \frac{r}{L} \cdot \arctan\left(\frac{\Delta u(t_0)}{l}\right) \quad (2)$$

式中:  $\arctan()$  表示反正切函数。

假设持续加载到时刻  $t$ , 混凝土测试截面对应于长期位移  $\Delta u(t, t_0)$  的长期剪切应变  $\gamma_L(t, t_0)$  为

$$\gamma_L(t, t_0) = \frac{r}{L} \cdot \arctan\left(\frac{\Delta u(t, t_0)}{l}\right) \quad (3)$$

长期剪切应变  $\gamma_L(t, t_0)$  即剪切徐变引起的应变  $\gamma_c(t, t_0)$ , 由于混凝土收缩和温度变化并不会导致截面转动, 测试结果无需补偿。

假设剪切徐变系数用  $\varphi_{sc}(t, t_0)$  表示, 则根据徐

变系数的定义有

$$\varphi_{sc}(t, t_0) = \frac{\gamma_c(t, t_0)}{\gamma(t_0)} \quad (4)$$

进而可得到加载完成后某时刻  $t$  的剪切徐变系数及徐变发展曲线。

承受轴向压力的受压构件的徐变系数为徐变应变与弹性应变的比值, 具体可参考相关文献<sup>[17]</sup>。

## 2 剪切徐变试验模型与加载

### 2.1 试验模型参数

针对一种材料的徐变试验通常需同时进行 3 组构件试验<sup>[18-19]</sup>, 由于试验条件所限, 本次试验仅针对 C30 混凝土, 基于上节徐变装置和测试原理, 一共制作了 5 组构件, 包括: 3 组剪切徐变构件, 1 组轴压徐变对比构件和 1 组温度收缩补偿构件 (补偿轴压徐变); 此外, 同时浇筑 3 组立方体强度标准试件。场地布置如图 3 所示。

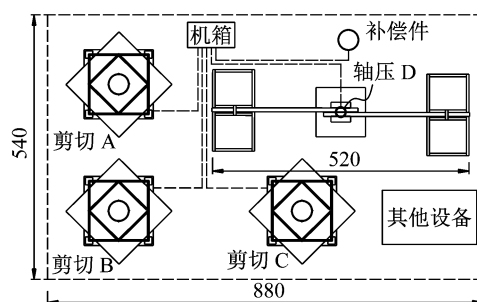


图 3 试验场地布置 (单位:cm)

Fig.3 Arrangement of experiment room (unit: cm)

试件与底座采用 C30 混凝土整体浇筑, 所用混凝土配比如表 1 所示, 三组立方体试件的 28 d 抗压强度为 29.6, 30.3, 30.7 MPa, 平均值为 30.2 MPa。按照规范, 剪切应力和轴向压应力的容许值分别取为 1.39 和 13.8 MPa。

表 1 试验混凝土配合比 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )Tab.1 Mixture proportions of experimental concrete (unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

材料	水泥	砂	石子	拌和水
掺入量	398	578	1 229	195

试件参数为: ① 三组剪切徐变圆柱体试件实测高度均为 140 cm、半径  $r=19.3$  cm; 底座为 150 cm  $\times$  150 cm  $\times$  20 cm 的棱柱体。试验构件底座采用双筋布设形式, 剪切试件在底座和圆柱体交接位置布置竖向钢筋, 避免加载时结合部开裂破坏。如图 4a 所示, 在模型制作过程中底座和剪切试件一次浇筑

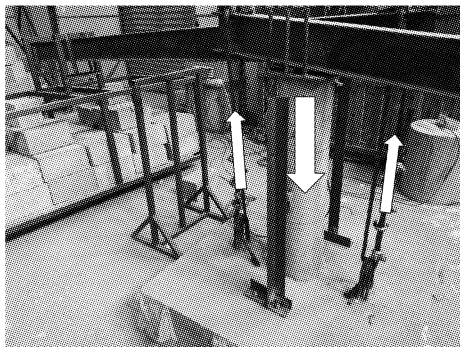
成形,使二者固结.加载及位移测量位置为距圆柱体试件顶部自由端 10 cm 处的截面,并在加载处布筋.持续荷载利用预制混凝土块的重力施加,尺寸为 15 cm×15 cm×30 cm,单块质量为 16 kg,加载完成后的装置如图 4b 所示.② 轴压徐变试验多采用棱柱体试件<sup>[18-19]</sup>,为与圆柱体剪切试件保持一致,本文的轴压徐变亦采用圆柱体试件;同时为减小堆载,截面适当减小:轴压试验构件为尺寸为 100 cm×100 cm×30 cm 的底座和高 140 cm、半径  $r=10$  cm 的圆柱体.如图 4c 所示,利用杠杆原理对试验构件对称施加荷载,可产生 8 倍于堆载的轴压加载力(杠杆比为 2.4 m/0.3 m);为了防止轴压构件加载端局部破坏,在加载端埋置钢板,并通过销轴的方式与加载工字



a 底座与试件固结成形



b 剪切徐变试验加载完成



c 轴压试件加载

图 4 试件制作与加载

Fig.4 Construction and loading of experimental specimen

钢梁连接.③ 由于收缩和温度变化不影响剪切试件的截面转动,因此补偿构件仅用于修正轴压徐变构件;由于仅测试温度和收缩应变,补偿构件高度调整为 100 cm.

## 2.2 试验加载过程

圆截面剪切试件在扭矩作用下,截面剪切应力由圆心沿径向逐渐增大,在截面外缘达到最大值.为更好的描述剪切徐变与试件剪切应力等级的关系,考虑不同应力的面积占比影响,采用按照面积加权平均的方式取截面平均应力代表值  $\tau_m$  定义剪切应力等级状态,如下

$$\tau_m = \frac{\int_0^r \frac{T\rho}{I_p} \times 2\pi\rho d\rho}{\pi r^2} = \frac{2Tr}{3I_p} = \frac{2}{3}\tau_{\max} \quad (5)$$

式中: $T$  为截面扭矩; $I_p$  为截面极惯性矩; $r$  为截面半径; $\rho$  为任一点到圆心的距离; $\tau_{\max}$  为截面最大剪切应力.

按式(5)对 3 组扭转剪切试验进行截面剪切应力状态等级计算,平均应力代表值  $\tau_m$  分别为 0.209、0.299、0.352 MPa(容许应力 1.39 MPa).

轴压试件全截面受压,则截面的应力状态为

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

式中: $\sigma_c$  为轴向应力; $F$  为构件所受轴向力; $A$  为截面面积.

根据本次试验加载情况,轴压构件的截面应力为 4.7 MPa(容许应力 13.9 MPa);4 组构件的实际应力控制在容许应力的 40% 以内,处于线性徐变假设范围.为确保构件在弹性状态范围内受力,按照应力水平对 A、B、C、D 等 4 组构件进行分级加载.加载过程中的试验值与弹性理论值对比如图 5 所示,其中图 5a、图 5b、图 5c 为剪切试验加载曲线,图 5d 为轴压试验加载曲线.总体上试验数据与理论值基本吻合,表明加载完成后试件处于弹性状态.

根据加载过程中的应力-应变曲线,在试验加载完成后 4 组试验构件的初始应变分别为 23.1  $\mu\text{rad}$ (剪切应变为弧度  $1 \mu\text{rad}=1 \text{rad} \cdot 10^{-6}$ )、35.2  $\mu\text{rad}$ 、42.2  $\mu\text{rad}$ 、137  $\mu\epsilon$ (轴压).各试验模型的最终加载情况及产生的最大剪切应力  $\tau_{\max}$  如表 2 所示.

## 3 剪切徐变试验结果分析

### 3.1 试验数据采集

对于 3 组剪切试验模型,分别在定位钢筋端部

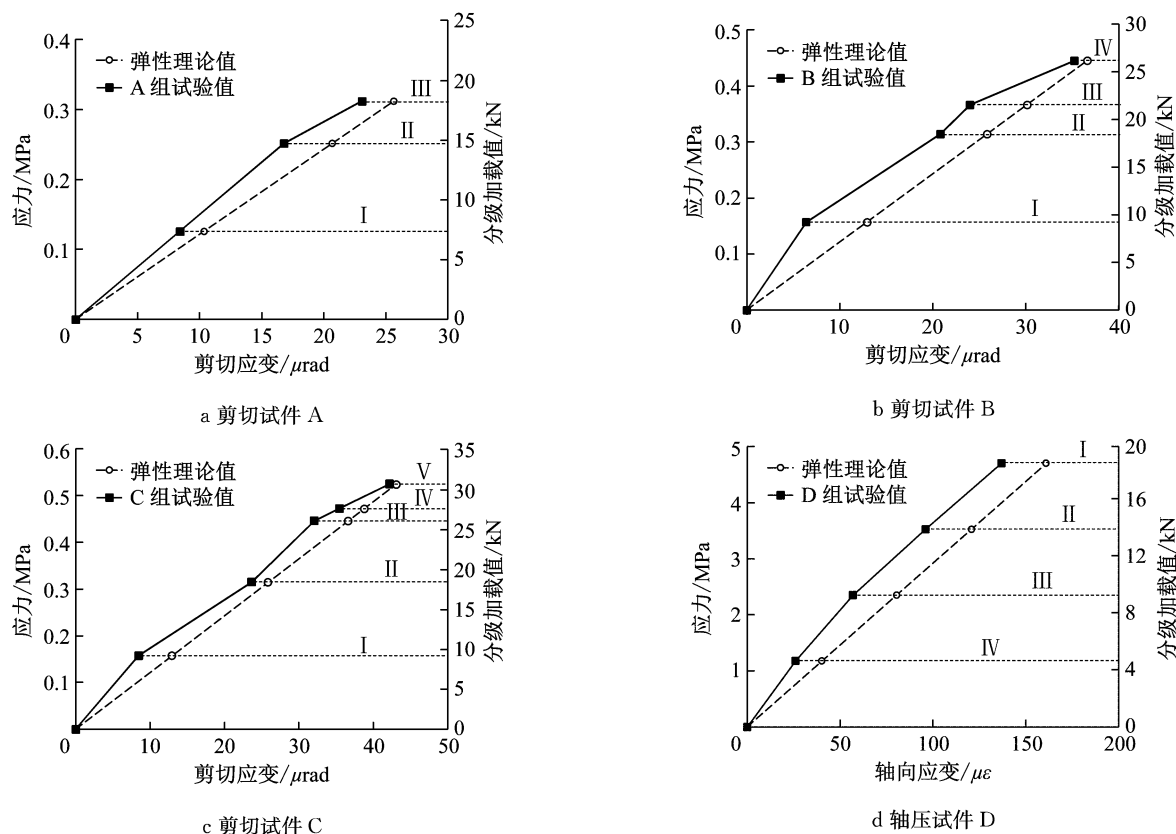


图 5 试验加载过程应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain relationship during the loading process

表 2 试验模型最终加载情况

Tab.2 Final load of experiment model

分组	加载值/kN	扭矩/kN·m	最大剪切应力/MPa
A	18.3(7.4,14.8)	3.55	0.314
B	26.14(9.2,18.5,21.5)	5.03	0.449
C	30.75(9.2,18.5,26.1,27.7)	5.92	0.528
D(轴压)	18.45(4.6,9.2,13.8)	147.6(轴向力/kN)	4.7(压应力/MPa)

注:括号内数值为分级加载值

布设位移计测量切向位移;对于轴压试件,在 1/2 高度位置表面,布设振弦式传感器和位移计测量;无荷载补偿块在试件表面安装振弦式传感器.为了保证数据的精确性,试验中位移计底座均安装于独立的钢架上,与支撑钢架脱离,避免加载干扰.

各组试件在加载全部完成,测试值稳定后,认为弹性阶段变形完成;持荷 375 d,传感器接机箱,每 0.5 h 采集一次数据.为考虑温度变化对轴压徐变的影响,同步采集试验室温度变化数据进行修正.

### 3.2 试验数据分析

在进行混凝土结构徐变特性计算时,利用实测徐变数据进行规范模型的参数修正是目前建议的较为精确的一种方法<sup>[20]</sup>,在具备试验条件时,在一些大型桥梁项目上已有应用<sup>[18]</sup>.目前轴压状态下的混凝土徐变预测模型主要有指数形式和乘积形式两

种,具有代表性的模型包括我国新实施的混凝土桥涵设计规范 JTG 3362-2018 模型<sup>[17]</sup>(延用 JTG D62-2004 模型)和 AASHTO 规范模型<sup>[21]</sup>.

依据 JTG 3362-2018 模型(以下简称 JTG 3362 模型),轴向受压徐变系数的理论值如下

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (7)$$

式中: $\varphi_0$  为名义徐变系数,与混凝土 28 d 龄期时的平均立方体抗压强度、混凝土加载龄期、构件理论厚度以及平均相对湿度有关.本文剪切试验构件理论厚度  $h=193$  mm,轴压试验构件理论厚度为  $h=100$  mm,加载龄期  $t_0$  为 14 d,根据名义徐变系数的计算公式,本试验剪切构件  $\varphi_0$  计算值为 2.80,轴压构件  $\varphi_0$  计算值为 3.08.  $t_1=1$  d,  $\beta_H$  是与构件理论厚度和平均相对湿度相关的系数,根据规范给出的计算公

式,本试验剪切构件  $\beta_H$  计算值为 540,轴压构件  $\beta_H$  计算值为 400.

针对剪切徐变,因为现行规范还没有专门的计算模型,为与轴压徐变模型进行对比,在 JTG3362 模型的基础上,引入调整系数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ,则式(7)改写为

$$\varphi_{sc}(t, t_0) = \alpha_1 \cdot \varphi_0 \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\alpha_2 \cdot \beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{\alpha_3 \cdot 0.3} \quad (8)$$

式中:  $\alpha_1$  用于调整徐变终极值,  $\alpha_2, \alpha_3$  用于调整拟合曲线的发展趋势. 将式(8)作为拟合函数应用最小二乘法对试验数据进行优化拟合,从而确定各拟合公式中的未知参数.

各剪切试件徐变系数的拟合曲线如图 6 所示,通过更新参数使规范修正模型与试验数据具有较高的拟合程度,调整后的参数见表 2,表中  $\tau_m$  为截面平均应力代表值.

结果表明剪切徐变的徐变终极值均超过轴压徐变终极值,其范围在轴压徐变的 2.26~2.63 倍. 导致 3 组剪切试验终极值存在波动的主要因素有: ① 混凝土浇筑质量的差异; ② 试验结果的离散性; ③ 剪切应力水平差异的影响.

除  $\alpha_1$  代表徐变终极值的变化外,  $\alpha_2, \alpha_3$  表示徐变发展趋势的变化, 3 组扭转剪切徐变试验的  $\alpha_2, \alpha_3$  取值相同(见表 3,分别为 0.1 和 3.2),表明 3 组剪切试验徐变系数的发展趋势基本相同. 如图 7 所示,在徐变终极值相同的情况下(假设为 1),长期来看剪切徐变模型的发展速率要高于 JTG3362 模型(轴压模型);但徐变早期(50 d 内)剪切徐变趋势小于轴压徐变,后期则逐渐加快.

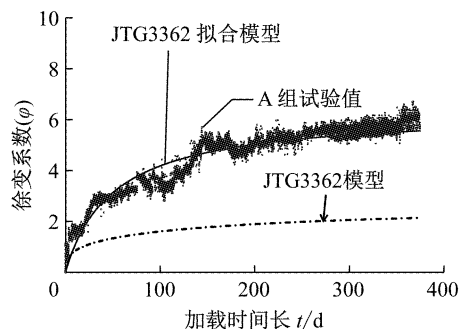
表 3 基于 JTG 3362—2018 剪切徐变拟合及修正系数

Tab.3 Fitting results and modified parameters for shear creep based on JTG 3362—2018

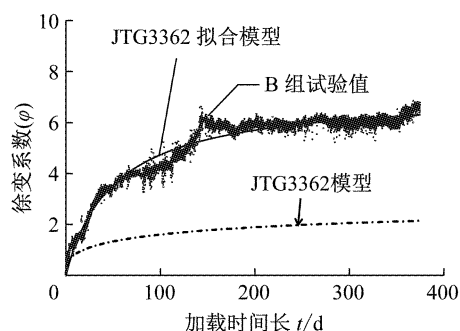
试验分组	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\tau/\text{MPa}$	相关系数
A	2.26	0.1	3.2	0.209	0.914
B	2.56	0.1	3.2	0.299	0.954
C	2.63	0.1	3.2	0.352	0.966
D	0.95	1	1	4.7 压应力	0.858

根据式(7)计算轴压徐变系数随时间的发展曲线,如图 8 所示, JTG3362 规范模型初期计算值与轴压(D组)试验值稍有偏离,但徐变后期规范值与试验值吻合较好,徐变终极值偏差约 5%,相关系数为 0.858.

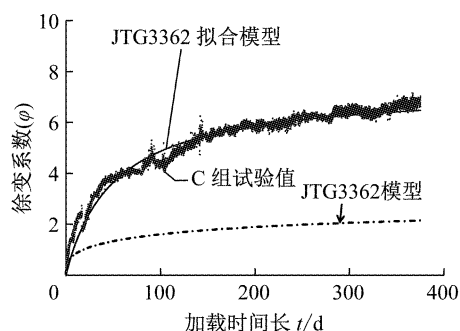
由 4 组试验结果对比可知,剪切徐变均大于轴压徐变,影响机理分析如下:徐变产生的过程为混凝土



a 剪切试件 A



b 剪切试件 B



c 剪切试件 C

图 6 剪切徐变系数及轴压徐变系数发展曲线

Fig.6 Creep coefficient curve of axial compression and shear testing

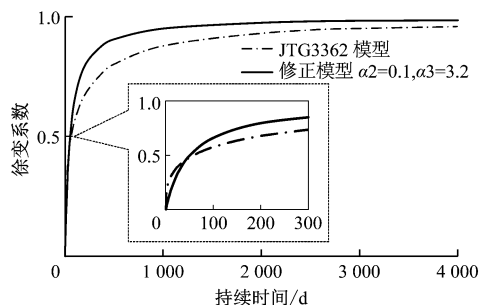


图 7 徐变发展曲线对比

Fig.7 Comparison of creep progress curve

空隙宽度随时间逐渐发生变化,宏观表现为构件产生与受力状态相关的徐变变形. 如图9所示,构件在

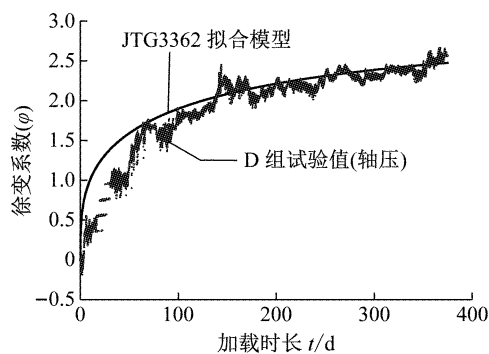


图8 轴压徐变系数(D组)

Fig.8 Creep Coefficient for Axial Compression

土材料在硬化过程中骨料沉降、拌合水的析出以及干缩应力会在混凝土组成材料的界面上形成一些微裂缝或者微小空隙,混凝土在受到外力后这些微小轴压状态微小空隙在轴向压力(单轴受力)的情况下收到压缩趋于闭合;而构件受扭产生的纯剪状态,可等效为双轴受力,在主轴受拉的同时在正交方向受到压应力作用,其状态较单轴受力明显不利,且微小空隙趋于张开,不易收敛,这是剪切徐变发展速率较快且徐变终极值相对较大的主要原因。图7中 $P$ 为轴向力; $\sigma$ 为压应力; $T$ 为构件所受扭矩; $\tau$ 为扭转产生的剪切应力; $\sigma_{\min}$ 和 $\sigma_{\max}$ 为等效的主拉和主压应力。

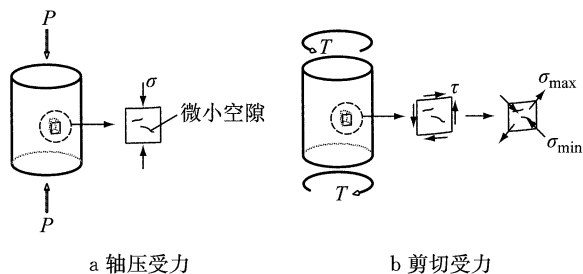


图9 轴压徐变与剪切徐变的受力状态对比

Fig.9 Comparison of stress between compression creep and shear creep

## 4 有限元模拟

剪切徐变系数主要用于需考虑剪切徐变影响的混凝土结构的时变效应计算场合。为验证剪切徐变系数与结构的剪切徐变变形的对应关系和试验方法的有效性,建立三维有限元模型进行模拟。

### 4.1 计算方法和参数

混凝土三维徐变的计算方法可分为累积增量法和应变率法两种。前者储存每计算时刻的应力增量,可对于应变率法的计算效率较低,但优点是适用性强,适用于所有类型的徐变函数曲线。本文采用累积

增量法进行计算,通过改变单元积分点的初应变,计入各计算时刻应变增量对后续计算点徐变变形的影响,具体计算原理见文献[9],不再赘述。

采用通用计算程序 ANSYS 建立混凝土试验柱的三维有限元模型,如图 10a 所示,圆柱模型底部固定,柱顶建立刚域并隶属于中心节点,在中心节点施加扭矩。模型共计 46 080 个单元,类型为 Solid185,所有单元除径向渐变段外均尽量接近规则六面体,具体离散情况如图 8b 所示。Solid185 单元共含 8 个积分点,各积分点的应变(S)由 6 个分量组成,分别为: SX, SY, SZ, SXY, SYZ, SXZ, 其中前 3 项为轴向应变(X 方向、Y 方向、Z 方向),后 3 项为剪切应变(XY 角度、YZ 角度、XZ 角度)。各积分点的徐变应变也由这 6 项组成,表示如下:  $f1(SX)$ ,  $f1(SY)$ ,  $f1(SZ)$ ,  $f2(SXY)$ ,  $f2(SYZ)$ ,  $f2(SXZ)$ , 其中  $f1$ 、 $f2$  分别为轴向徐变和剪切徐变的计算函数。如设置  $f2$  与  $f1$  相同,则表示三维徐变采用单一的轴向徐变模型;如设置  $f2(SXY)$ 、 $f2(SYZ)$ 、 $f2(SXZ)$  均为 0 值,则表示模型计算不考虑剪切徐变。

有限元模型材料参数与试验模型实测值保持一致,弹性模量为 29.2 GPa,泊松比取 0.2。模型采用国际单位制(长度单位 m,扭矩单位 N·m,应力单位 Pa)和笛卡尔坐标系,约定如下:坐标原点位于柱底圆心;竖向为 Y 向;圆柱各横截面位于 XZ 平面内,以顶部截面为例,如图 10b 位于 X 轴的节点 13 438 的坐标为( $X=0.193$ ,  $Y=1.300$ ,  $Z=0$ )。在圆心扭矩作用下,同一高度各圆周节点的切向位移均相同,方便起见以下结果均以 13 438 节点为例。

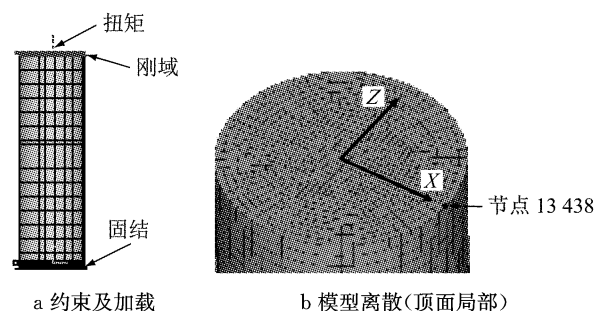


图10 试验柱有限元模型

Fig.10 Finite element model of test column

### 4.2 计算结果

如图 11 所示,圆柱有限元模型在施加扭矩并发生徐变变形后,主要产生围绕顶面圆心的扭转,基本无竖向变形(例如模型 C 在 375 d 的竖向变形仅为  $-4.95 \times 10^{-16}$  m)。这与圆柱承受扭矩处于纯剪切状态,而轴向(竖向)约束扭转正应力几乎可忽略是一致的(竖向应力小于 0.007 9 Pa)。说明单元各节点

的轴向应力很小,模型主要呈现出受剪状态.

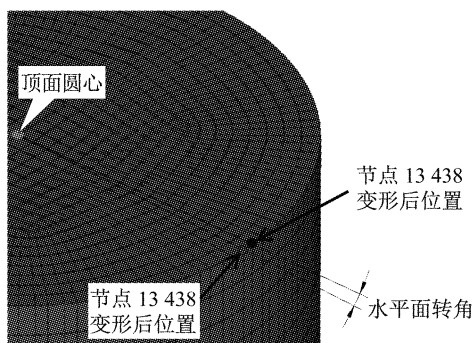


图 11 扭转剪切徐变变形示意(模型 C 在 375 d 时的总变形,放大系数 50)

Fig. 11 Diagram of torsion shear creep deformation (total deformation of Model C at 375 day, amplification coefficient 50)

以受荷最大的模型 C 为例,对比 4 种计算工况:

- ① 仅考虑轴向徐变;② 轴向徐变、剪切徐变相同(均为 JTG3362);③ 轴向徐变+试验剪切徐变模型;
- ④ 仅试验剪切徐变模型,不考虑轴向徐变.

如图 12 所示,对于扭转受力构件,若仅考虑轴向徐变、不考虑剪切徐变,则完全不会产生长期变形,可见对于剪切受力显著的结构,在计算长期变形时必须考虑剪切徐变的影响;若剪切徐变采用与轴向徐变相同的模式(JTG3362),则长期变形计算结果偏小(偏不安全);由于纯扭转的构件的轴向应力可忽略,因此同时考虑轴向徐变和剪切徐变③和仅考虑剪切徐变④的计算结果基本重合. 工况③375 d 的剪切应变与弹性应变的比值为 6.47,与材料的徐变参数 6.52 相差仅 0.77%,从而验证了采用本文方法可有效测试混凝土的剪切徐变系数.

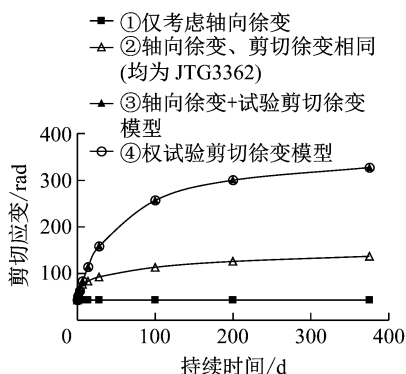


图 12 有限元结果对比

Fig. 12 Comparison of FE analysis results

## 5 结论

(1) 针对混凝土剪切徐变系数,提出了基于扭转的试验装置,可用于混凝土剪切应力的分级施加与长期稳定持荷.

(2) 利用扭转剪切推导的徐变系数计算公式,通过切向位移得到徐变系数发展系数,可为试验分析提供参考.

(3) 混凝土剪切徐变试验表明:剪切徐变早期发展小于轴向徐变,后期则逐渐加速;C30 剪切徐变值可达规范轴压徐变值的 2.31~2.62 倍;随着应力的增加,徐变终极值有增长趋势.

(4) 对于受扭构件和其他剪切应力显著的构件,在长期变形计算时应计入剪切徐变系数. 基于累积增量法的三维徐变计算程序可考虑剪切徐变与轴向徐变的差异.

(5) 由于试验条件所限,本文只进行了 3 组构件的试验应用,更加深入的混凝土剪切徐变系数的测定工作,包括考虑混凝土强度等级变化、龄期变化、剪应力增大后的非线性效应等影响和针对性的表达式需进一步开展研究,以期形成较为完整的剪切徐变预测模型.

## 参考文献:

- [1] BURGOYNE Chris, SCANTLEBURY Richard. Why did Palau bridge collapse? [J]. The Structural Engineer, 2006, 84 (11): 30.
- [2] BAŽANT Zdeněk P, LI Guanghua, YU Qiang. Explanation of excessive long-time deflections of collapsed record-span box girder bridge in Palau, Preliminary report [R]. Evanston: Northwestern University, Illinois US, 2008.
- [3] 牛艳伟,石雪飞,阮欣. 大跨径混凝土梁桥的长期挠度实测分析[J]. 工程力学, 2008, 25(S1): 116.  
NIU Yanwei, SHI Xuefei, RUAN Xin. Measured sustained deflection analysis of long-span prestressed concrete beam bridges[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S1): 116.
- [4] 吕志涛,潘钻峰. 大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 70.  
Lǚ Zhitao, PAN Zuanfeng. Issues in design of long-span prestressed concrete box girder bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(1): 70.
- [5] 吕志涛,潘钻峰. 斜向开裂混凝土梁的瞬时及长期剪切变形[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 1.  
Lǚ Zhitao, PAN Zuanfeng. Instantaneous and long-term shear deformation of inclined cracks concrete beams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 1.
- [6] 李宏江,王荣霞,李万恒,等. 大跨径预应力混凝土箱梁的剪切



- 变形分析[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(2):286.
- LI Hongjiang, WANG Rongxia, LI Wanheng, *et al.* Analysis on shearing deformation of long-span prestressed concrete box girders[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 286.
- [7] 黄海东,向中富,郑皆连. PC箱梁桥三维徐变效应精细化分析[J].中国公路学报,2013,26(5):108.
- HUANG Haidong, XIANG Zhongfu, ZHENG Jielian. Refined analysis of three-dimensional creep effect for PC box-girder bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 108.
- [8] 汪剑,方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析[J].土木工程学报,2008,41(1):70.
- WANG Jian, FANG Zhi. Analysis and field measurement of concrete box girder bridges for shrinkage and creep effects[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1): 70.
- [9] 牛艳伟,石雪飞,阮欣. 混凝土结构三维徐变的有限元计算方法[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(4):475.
- NIU Yanwei, SHI Xuefei, RUAN Xin. A finite element analysis method of concrete structure with three dimensional creep[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(4): 475.
- [10] RAJEEV G, RAM K, PAUL D K. Comparative study of various creep and shrinkage prediction models for concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(3): 249.
- [11] WENDNER R, HUBLER M, BAŽANT Z. The B4 model for multi-decade creep and shrinkage prediction [C]// Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete. Princeton: American Society of Civil Engineerings, 2014: 429-439.
- [12] BAŽANT Z, PRASANNAN S. Solidification theory for concrete creep[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(8): 1691.
- [13] KHAZANOVICH L, TULEUBEKOV K. Micromechanical model of concrete creep [C]// Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage and Durability of Concrete. Princeton: American Society of Civil Engineers, 2014: 227-234.
- [14] HILAIRE A, BENBOUDJEMA F, *et al.* Analysis of concrete creep in compression, tension and bending; numerical modeling [C]// Mechanics and Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete. Princeton: American Society of Civil Engineerings, 2014: 348-355.
- [15] WEI Y, HANSEN W. Tensile creep behavior of concrete subject to constant restraint at very early ages[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1277.
- [16] 郑开启,刘钊,史国刚,等. 带斜裂缝变截面混凝土梁剪切变形试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):1.
- ZHENG Kaiqi, LIU Zhao, SHI Guogang, *et al.* Experimental study on shear deformation of variable depth RC beams with web diagonal cracks [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 1.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Ministry of Communication of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [18] 刘沐宇,李倩,黄岳斌,等. 港珠澳大桥钢-混组合连续梁超长时间收缩徐变效应[J].中国公路学报,2016,29(12):60.
- LIU Muyu, LI Qian, HUANG Yuebin, *et al.* Ultra-long time performance of steel-concrete composite continuous beam in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge with creep and shrinkage of concrete slabs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 60.
- [19] 陈素君,唐盛华,张国刚,等. 混凝土斜拉桥长期性能试验[J].中国公路学报,2011,24(4):39.
- CHEN Sujun, TANG Shenghua, ZHANG Guogang, *et al.* Experiment of long-term performance of concrete cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(4): 39.
- [20] GILBERT R I, RANZI G. Time-behaviour of concrete structures[M]. Oxon: Spon Press, 2011.
- [21] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO FRFD bridge design specifications[S]. 3rd ed. Washington D C: ASSHTO, 2004.